

Bal kamrai excesszív trabeculáció: multimodális képkalkotásból nyert ismeretek és a jobb kamra értékelésének új megközelítései

Doktori értekezés

Dr. Horváth Márton

Semmelweis Egyetem

Klinikai orvostudományok Doktori Iskola



Témavezető: Dr. Szűcs Andrea, Ph.D., egyetemi docens

Hivatalos bírálók: Dr. Apor Astrid, Ph.D., egyetemi docens
Dr. Jenei Csaba Ph.D., osztályvezető főorvos

Komplex vizsga szakmai bizottság:

Elnök: Dr. Reusz György, DSc, egyetemi tanár

Tagok: Dr. Prohászka Zoltán, DSc., egyetemi tanár

Dr. Kovács Mihály, DSc., egyetemi tanár

Budapest

2026

1. Bevezetés

Az új 2023-as ESC kardiomiopátia-irányelvek a bal kamrai hypertrabekulációt (LVET) új megvilágításba helyezték, hangsúlyozva, hogy nem önálló körkép, hanem egy morfológiai jelenség, amelyet az adott klinikai és genetikai környezetben kell értékelni. A trabekularizáció mértéke egészséges személyekben is széles skálán mozoghat, ugyanakkor a jelentős hypertrabekularizáció kardiomiopátiás fenotípusok esetén fontos szerepet játszik a differenciáldiagnosztikában és a rizikóstratifikációban.

A bal kamrai trabekularizáció az embrionális fejlődés természetes része, mely kezdetben a tápanyag- és gázcseré felületének növelését szolgálja a koronária keringés kialakulása előtt. A trabekuláris hálózat fejlődése során a kompakt és a trabekulált myocardium párhuzamos, részben független növekedést mutat, a LVET így nem a kompaktalódás elmaradásának következménye (mint ezt korábban gondolták), hanem egy morfológiai jelenség, amely részben genetikai, részben egyéb tényezők hatására alakulhat ki. A primer hypertrabekularizációt a genetikai adottságok határozzák meg, míg a szekunder állapotok háttérben fiziológiás vagy patológiás etiológiával különböző hemodinamikai állapotok (sport vagy terhesség) vagy betegségek (pl. anaemia, hypertonia) állnak.

A bal kamrai hypertrabekuláció klinikai jelentőségét vizsgáló MESA tanulmányban a 10 évig utánkövetett páciensek klinikuma nem mutatott jelentős változást, ugyanakkor munkacsoportunk és más publikációk is számos eltérést mutattak a normál trabekuláltságú páciensek volumetriás és funkcionális jellemzői tekintetében. Ugyanakkor utánkövetéses vizsgálataink során számos esetben talákoztunk bal kamra funkció csökkenéssel járó primer hypertrabekulációval is, mely aláhúzza a hypertrabekularizációval élő páciensek esetében a rizikóbecslés fontosságát. A morfológiai értékelés tehát önmagában nem elegendő a diagnózishoz, a multimodális megközelítés segítséget nyújthat a páciensek rizikóbecslése során.

A jobb kamra (RV) anatómiailag és funkcionálisan is eltér a bal kamrától, trabekuláltabb szerkezet jellemzi még egészséges egyéneknél is. Emiatt a jobb kamra trabekulációjának mennyiségi értékelése önmagában nem alkalmas a kóros eltérések felismerésére.

A jobb kamrai excesszív trabekuláció diagnosztikai megítélése kevésbé standardizált, mivel nincsenek egységes arány-, vagy tömegalapú kritériumok, és az interindividuális variabilitás nagy. Ennek ellenére egyre több adat utal arra, hogy bizonyos LVET fenotípusokban a jobb kamra is érintett lehet, ami szubklinikai funkcionális eltérésekkel járhat még megtartott ejekciós frakció (EF) mellett is.

A jobb kamra funkcionális vizsgálata jelenleg nem része a LVET rutinértékelésének, ugyanakkor új vizsgálatok, köztük saját eredményeink is, arra utalnak, hogy a jobb kamrai mechanika elemzése értékes kiegészítő információt nyújthat a fenotípus mélyebb megértéséhez. A biventricularis kölcsönhatások feltérképezése így új irányt

jelenthet az LVET funkcionális jellemzésében és az esetleges korai remodelling folyamatainak felismerésében.

A bal kamrai hypertrabeculatio (LVET) diagnózisa több képalkotó modalitással lehetséges, azonban ezek eltérő elérhetőségük és információtartalmuk miatt különböző szerepet töltenek be a diagnosztikában és utánkövetésben.

A szív-MR továbbra is a gold standard a trabekuláció morfológiai és szöveti karakterizálására. Nagy térbeli és kontrasztfelbontása lehetővé teszi a kompakt és trabekulált réteg pontos elkülönítését, valamint a fibrosis és egyéb szöveti eltérések kimutatását. A Petersen- és Jacquier-kritériumok ma is leggyakrabban alkalmazott kvantitatív módszerek, ugyanakkor korlátozott specifitásuk miatt az eredményeket mindig klinikai kontextusban kell értékelni. Az új threshold-based és feature-tracking technikák javítják a mérési reprodukálhatóságot, valamint lehetővé teszik a deformációanalízist, amely a szubklinikai funkcionális eltérések kimutatásának kulcsa.

A 2D transthoracalis echokardiográfia széles körű hozzáférhetősége miatt az LVET gyanújának elsővonalbeli vizsgálómódszere. Bár a trabekuláció részletes morfológiai megítélése korlátozott, a kamrai méretek és a systolés funkció pontosan mérhető. A speckle-tracking strainanalízis segítségével korai, szubklinikai bal kamrai funkciózavarok is felismerhetők, amelyek prognosztikai jelentőséggel bírhatnak.

A 3D echokardiográfia az utóbbi években vált a funkcionális értékelés meghatározó eszközévé. Egyetlen térfogati adatállományból képes meghatározni a valódi kamrai térfogatokat, ezáltal pontosabban becsüli a volumetriai és deformációs paramétereket, mint a 2D módszerek. A 3D speckle-tracking lehetővé teszi mind a bal, mind a jobb kamrai strain komponensek elemzését, és érzékenyen jelzi a trabekulációhoz társuló finom funkcionális eltéréseket.

A jobb kamrai érintettség megítélésében különösen fontos a funkcionális analízis. A 3D echokardiográfias adatokon alapuló mozgáselemző szoftverek (pl. ReVISION) képesek a jobb kamrai kontrakció irányfüggő komponenseinek kvantitatív értékelésére, így azonosíthatók olyan finom mozgásmintázatok, amelyek a betegség korai stádiumában is eltérést jeleznek, még megtartott ejekciós frakció mellett is.

Összességében a CMR továbbra is a morfológiai diagnózis alapját képezi, míg az echokardiográfia – különösen a 3D és strain-analízis – a funkcionális követésre és a szubklinikai eltérések detektálására alkalmas, non-invazív és költséghatékony módszer.

2. Célok

Képalkotó modalitások összehasonlítása LVET morfológiával élő személyekben

Első kutatásunk célja a 2D és 3D echokardiográfia, valamint a szív-MR (CMR) kvantitatív morfológiai paramétereinek összevetése volt LVET-vel élő személyek és egészséges kontrollok között. Célul tűztük ki továbbá annak meghatározását, hogy a különböző képalkotó technikák milyen pontossággal mérik a kamrai volumeneket és strain-értékeket.

LVET jobb kamrai érintettségének 3D echocardiographiás vizsgálata

A második tanulmány célja volt a jobb kamra volumetrikus és funkcionális paramétereinek elemzése LVET-vel élő, megtartott bal kamrai ejekciós frakciójú személyekben, valamint ezek összehasonlítása egészséges kontrollokkal. További célunk volt a bal és jobb kamra közötti morfológiai és funkcionális összefüggések vizsgálata, különösen a két kamra közötti kölcsönhatások feltérképezése.

LVET jobb kamrai érintettségének vizsgálata egy új perspektívából

A harmadik kutatás célja a jobb kamrai kontrakció három fő iránykomponensének (longitudinális, radiális, anteroposterior) kvantitatív jellemzése volt 3D echokardiográfias adatok alapján. Célunk volt továbbá annak megállapítása, hogy a LVET-hez társulnak-e olyan diszkrét mozgásmintázatbeli eltérések, amelyek a globális ejekciós frakciót még nem érintik, de funkcionális átrendeződésre utalnak. Ez a megközelítés új szemszögből vizsgálja a jobb kamrai mechanikát, túlmutatva a hagyományos globális funkcionális paramétereken.

3. Módszerek

Vizsgált populáció

Első vizsgálatunkba 38, korábban CMR-el diagnosztizált LVET páciens (átlag életkor: 31 ± 14 év; férfi: $n = 19$) és 38 egészséges önkéntes (átlag életkor: 36 ± 13 év; férfi: $n = 25$) volumetriás és funkcionális paramétereit hasonlítottuk össze. Ugyanazon vizit alkalmával minden résztvevő 2D TTE, 3D TTE és CMR vizsgálaton esett át.

A második tanulmányban 41, korábban CMR-el diagnosztizált LVET páciens (átlagéletkor: $39,58 \pm 15$ év; férfi: $n = 26$) és 41 egészséges kontrollszemély (átlagéletkor: $39,64 \pm 15$ év; férfi: $n = 26$) vett részt, akik jobb és bal kamrai fókuszú 3D TTE vizsgálaton estek át.

A harmadik kutatásunk 37 LVET beteget (átlagéletkor: $40,2 \pm 15$ év; férfi: $n = 22$) és 37 egészséges kontrollszemélyt (átlagéletkor: $40,3 \pm 15$ év; férfi: $n = 22$) elemzett. Minden résztvevő esetén jobb- és bal kamrai fókuszú 3D TTE vizsgálatot végeztünk.

Képkötő modalitások

A CMR vizsgálatokat Philips Achieva, valamint Siemens Magnetom Aera 1,5 Teslás MR berendezéssel, azonos beállításokkal végeztük rövid- és hosszú tengelyű cine sorozatok felvételével.

A 2D és 3D echokardiográfiás felvételeket GE Vivid E95 készülékkel, 4Vc-D phased-array transzducerrel rögzítettük, a 3D dataseteket apicalis nézetből, négyütemű (4-beat) multivolume rekonstrukcióval gyűjtöttük. Az offline elemzést a TomTec 4D LV Analysis és 4D RV Function szoftverekkel végeztük.

A deformációs analízishez echocardiographia esetén speckle-tracking, CMR felvételek esetén Feature tracking algoritmust használtunk.

A bal és jobb kamrai endocardium kontúrját mind a CMR, mind az echocardiographiás felvételeken a kompakt és non-kompakt réteg határán húztuk meg, így a trabekulált zónát a kamrai üreghöz soroltuk.

A harmadik vizsgálat során a 3D jobb kamrai modelleket a ReVISION szoftverrel elemeztük. A program a jobb kamrai ejekciót három ortogonális komponensre bontja: longitudinális (LEF), radiális (REF) és anteroposterior (AEF) irányú ejekciós frakcióra.

Statisztikai analízis

Az adatok eloszlását Shapiro–Wilk-próbával ellenőriztük. Normális eloszlás esetén Student-féle t-próbát, egyébként Mann–Whitney U-tesztet alkalmaztunk. A korrelációkat Pearson-féle módszerrel vizsgáltuk, és az összefüggéseket gyenge ($<0,3$), közepes ($0,3–0,6$) vagy erős ($>0,6$) kategóriába soroltuk.

A jobb kamrai paraméterek független prediktorainak azonosítására többszörös lineáris regressziós analízist végeztünk.

A módszerek közötti egyezést Bland–Altman-analízissel, míg a vizsgálók közötti reprodukálhatóságot intraclass correlation coefficienttel (ICC) értékeltük.

A statisztikai szignifikanciaszintet $p < 0,05$ értékben határoztuk meg. Az elemzéseket SPSS és Microsoft Excel programmal végeztük.

4. Eredmények

Képkeltő modalitások összehasonlítása LVET morfológiával élő személyekben

Mindhárom képkeltő modalitás (2D TTE, 3D TTE és CMR) esetén a LVET páciensek magasabb bal kamrai volumenértékeket mutattak az egészséges kontrollokhoz képest.

	Egészséges			LVET			p value		
Esetszám (férfi)	38 (25)			34 (19)			Egészséges vs. LVET		
Életkor (év)	36±13			31±14					
	2D_TTE	3D_TTE	CMR	2D_TTE	3D_TTE	CMR	2D_TTE	3D_TTE	CMR
EDV(i) (ml/m ²)	72.1±10.4	74.1±16.3	82.5±19.2	77.4±14.2	81.8±17.7	82.9±15.3	0.005*	0.05*	0.1
ESV(i) (ml/m ²)	30.6±6.3	30.9±6.9	32.8±10.5	36.5±7.3	37.9±8.7	32.6±8.4	<0.01*	<0.01*	0.3
SV(i) (ml/m ²)	41.5±6.5	43.1±10.1	49.7±1	40.9±7.4	43.8±9.7	50.2±8.5	0.1	0.1	0.09
EF (%)	57.5±5	58.1±3	60.9±5	52.9±3.0	53.6±3	61.3±8	<0.01*	<0.01*	0.8
GLS (%)	-21.5±2.9	-20.2±2.5	-23.9±2.3	-20.6±1.8	-28.9±2.9	-21.1±3.1	0.1	0.07	<0.01*
GCS (%)	-25.9±3.5	-27.1±2.5	-33.8±4.1	-24.7±3.7	-24.6±2.3	-30.1±3.5	0.2	<0.01*	<0.01*

1. Táblázat: Vizsgálati csoportok alap jellemzői.

*LVET: fokozott bal kamrai trabekularizáció; TTE: Transthoracalis echocardiographia; CMR: Szív-MR; EDV: Végdiasztolés volumen; ESV: Végzsiztolés volumen; SV: Verőtérfogat; EF: Ejekciós frakció; GLS: Globális longitudinális strain; GCS: Globális cirkumferenciális strain; (i): Testfelszínre indexált érték; *: p<0.05*

A kontrolles csoport esetén a volumetriás paraméterek kiváló korrelációt és jó egyezést mutattak mindhárom modalitáspár között. Az LVET-csoportban a végdiasztolés volumen (EDV) és verővolumen (SV) közepesen erős vagy erős intermodális korrelációt mutatott, míg az ESV-értékek esetén a kapcsolat gyengébb volt, különösen az echokardiográfias és CMR-mérések között. Ez a különbség feltehetően a szisztolés során gyengébben ábrázolható endocardialis trabekuláció következménye.

A Bland–Altman analízis alapú százalékos hibák (PE) elemzése ugyanezt a tendenciát támasztotta alá. A 3D TTE és CMR által mért volumetriás paraméterek szoros egyezést mutattak, a korrelációs együtthatók megközelítették a 0,9-et, és a legtöbb PE-érték 0,3 alatt maradt, ami klinikailag elfogadható határnak tekinthető.

A funkcionális paraméterek (EF, GLS és GCS) esetében a korrelációk gyengébbek voltak, és a modalitások közötti egyezés csökkent, különösen az LVET-csoportban. Bár a statisztikailag szignifikáns összefüggések száma mindkét csoportban hasonló volt, az LVET-populációban ezek gyengébbek és kevésbé megbízhatók voltak. Az egyezés a modalitások között az egészséges csoportban 89%, míg az LVET-csoportban mindössze 38% volt.

	Egészséges			LVET		
	2D_TTE-3D_TTE	2D_TTE-CMR	3D_TTE-CMR	2D_TTE-3D_TTE	2D_TTE-CMR	3D_TTE-CMR
A+, C+	EDV(i), ESV(i), SV(i), EF, GCS	EDV(i), SV(i), GLS	EDV(i), ESV(i), SV(i)	EDV(i)	SV(i), GLS	SV(i)
A-, C+		ESV(i)		ESV(i), SV(i)	EDV(i)	EDV(i), ESV(i)
A+, C-		EF, GCS	EF, GLS(i), GCS(i)	EF	EF,	EF, GCS
A-, C-	GLS			GLS, GCS	ESV(i), GCS	GLS

2. Táblázat: Egyezés és korrelációs eredmények összefoglalása.

LVET: bal kamrai fokozott trabek fokozott bal kamrai trabekularizáció; TTE: transthoracalis echokardiográfia; CMR: szív mágneses rezonancia vizsgálat; A+: elfogadható egyezés; A-: nem elfogadható egyezés; C+: elfogadható korreláció; C-: nem elfogadható korreláció; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; EF: ejekciós frakció; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; (i): testfelszínre indexált érték.

LVET jobb kamrai érintettségének 3D echocardiographiás vizsgálata

A vizsgált populációban a bal kamrai volumetrikus és funkcionális paraméterek megtartott tartományon belül voltak, ugyanakkor az LVET-csoportban a kamrai volumenek szignifikánsan magasabbak, az ejekciós frakció (EF) és a strainértékek (GLS, GCS) pedig alacsonyabbak voltak az egészséges kontrollokhoz képest (→ táblázat).

BK	LVET	Egészséges	p
EDVi (ml)	76.65 ± 16.6	58.13 ± 9.79	<0.001
ESVi (ml)	36.05 ± 7.95	23.39 ± 4.63	<0.001
SVi (ml)	40.59 ± 9.13	34.93 ± 5.95	<0.001
EF (%)	52.91 ± 2.76	59.75 ± 3.41	<0.001
GLS (%)	-19.01 ± 2.99	-20.60 ± 1.99	<0.001
GCS (%)	-24.12 ± 2.48	-29.92 ± 2.75	<0.001
JK			
EDVi (ml)	56.01 ± 12.03	56.79 ± 12.37	0.854
ESVi (ml)	26.06 ± 6.57	23.89 ± 6.55	0.147
SVi (ml)	30.58 ± 7.33	33.04 ± 6.70	0.095
EF (%)	53.97 ± 5.71	58.83 ± 4.20	<0.001
SLS(%)	-17.46 ± 4.15	-20.57 ± 3.97	<0.001
FWLS (%)	-27.09 ± 5.58	-30.74 ± 5.11	0.006

3. Táblázat: 3D volumetriás és funkcionális értékek összehasonlítása az LVET és Egészséges csoportban.

LVET: fokozott bal kamrai trabekularizáció; BK: bal kamra; JK: jobb kamra; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; EF: ejekciós frakció; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; SLS: szeptális longitudinális strain; FWLS: szabad fali longitudinális strain.

A jobb kamrai volumetriás értékek (EDV, ESV, SV) az LVET-csoportban és a kontrollcsoportban sem különböztek szignifikánsan, ugyanakkor az EF és a strain paraméterek jelentősen alacsonyabbak voltak az LVET-populációban. Ez arra utal, hogy a jobb kamrai funkcióban már megtartott globális ejekciós frakció mellett is finom, subklinikus eltérések mutathatók ki.

A korrelációs analízis alapján a jobb és bal kamrai paraméterek között szoros összefüggések voltak. A RV EDV és RV SV is korrelált a bal kamrai volumenparaméterekkel, míg a RV EF erős kapcsolatot mutatott mind az LV EF, mind az LV GLS értékeivel. A jobb kamrai strainparaméterek (SLS, FWLS) szintén korreláltak a bal kamrai funkcionális mutatókkal, jelezve a két kamra közötti ventricularis interdependenciát.

		BK_EDVi	BK_ESVi	BK_SVi	BK_EF	BK_GLS	BK_GCS
JK_EDVi	r	0.40*	0.38*	0.40*	0.01	-0.07	-0.05
	p	0.01	0.02	0.01	0.99	0.69	0.79
JK_ESVi	r	0.28	0.34*	0.21	-0.31	-0.32	-0.26
	p	0.09	0.04	0.21	0.06	0.05	0.12
JK_SVi	r	0.42**	0.34*	0.47**	0.26	0.18	0.09
	p	0.01	0.04	0.01	0.12	0.27	0.57
JK_EF	r	0.16	0.03	0.27	0.55**	0.52**	0.32
	p	0.34	0.89	0.10	0.00	0.01	0.05
JK_SLS	r	-0.05	-0.15	0.04	0.41**	0.22	0.26
	p	0.77	0.37	0.80	0.01	0.18	0.12
JK_FWLS	r	-0.06	-0.19	0.07	0.55**	0.23	0.28
	p	0.74	0.25	0.69	0.000	0.16	0.08

4. Táblázat: Bal- és jobb kamrai paraméterek korrelációja az LVET csoportban.

LVET: fokozott bal kamrai trabekularizáció; BK: bal kamra; JK: jobb kamra; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; EF: ejekciós frakció; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; SLS: szeptális longitudinális strain; FWLS: szabad fali longitudinális strain; r: korrelációs együttható; (i): testfelszínre indexált érték; *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$.

A lineáris regressziós modellünk alapján a bal kamrai végdiasztolés és végszisztolés térfogat független prediktora volt a jobb kamrai volumetriás értékeknek, ami arra utal, hogy a bal kamra morfológiai sajátosságai befolyásolhatják a jobb kamra térfogattal LVET-ben.

Kovariáns	JK_EDV		JK_ESV	
	β	p	β	p
BK_EDVi	3.855	0.034*	2.614	0.036*
BK_ESVi	-7.701	0.043*	-5.285	0.044*
BK_EF	-5.075	0.057	-4.006	0.030*
BK_GLS	-0.661	0.241	-0.624	0.111
BK_GCS	-0.893	0.368	-0.580	0.394
Kumulatív r	0.522		0.554	
Standard hiba	7.805		5.,372	
Kumulatív p	0.025*		0.014*	

5. Táblázat: Jobb kamrai volumetriás paraméterek regressziós vizsgálata.

*BK: bal kamra; JK: jobb kamra; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; EF: ejekciós frakció; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; (i): testfelszínre indexált érték; *: $p < 0,05$.*

A klinikai jellemzők vizsgálata során a betegek több mint fele esetében igazolható volt családi halmozódás, és az esetek 39 %-ában korábban dokumentált aritmia szerepelt. A betegek mintegy 12 %-a élt át ismeretlen eredetű syncope-t, és kb. 40 %-uknál ventricularis ritmuszavar fordult elő. Két esetben történt resuscitatio, egy betegnél thromboemboliás esemény is előfordult.

Klinikai karakterisztika	Prevalencia
Pozitív családi anamnézis	51.2%
• Örökletes szívizombetegség	66.7%
• Hirtelen szívhalál	23.8%
• Ritmuszavar	90.5%
• PM / ICD implantáció	19.0%
Ájulás	12.2%
EKG-val igazolt ritmuszavar	39.0%
• Pitvari	50.0%
• Kamrai	68.8%
VES	90.9%
NSVT	9.1%
PM implantáció	2.4%
Újraélesztés	4.9%
TIA/Stroke	2.4%

6. Táblázat: LVET populáció klinikai karakterisztikája.

Rövidítések: PM: pacemaker, ICD: implantálható cardioverter defibrillator, VES: kamrai extrasystole, NSVT: non-sustained kamrai tachycardia, TIA: tranziens ischaemiás attack

LVET jobb kamrai érintettségének vizsgálata egy új perspektívából

Harmadik vizsgálatunk során a jobb kamrai kontrakció három ortogonális komponensét (longitudinális (LEF), radiális (REF) és anteroposterior (AEF) ejekciós frakciót) értékeltük a ReVISION szoftver segítségével. A globális jobb kamrai ejekciós frakció (RVEF) megtartott maradt az LVET-csoportban, azonban a mozgáskomponensek aránya jelentősen eltért az egészséges kontrollokétól (→ ábra).

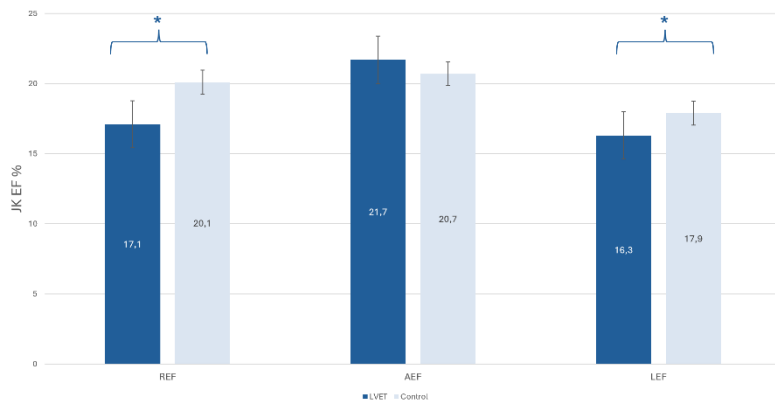
BK	LVET	Egészséges	p
EDV(i)	76.3±17.8	58.9±10.2	<0.01
ESV(i)	35.9±8.7	23.6±4.8	<0.01
SV(i)	40.4±9.6	35.3±6.1	0.008
EF(%)	52.4±3.4	60.1±4.1	<0.01
GLS(%)	-19.1±2.9	-20.6±2.0	0.003
GCS(%)	-24.2±2.6	-30.2±2.7	<0.01
JK	LVET	Egészséges	p
EDV(i)	56.5±13.9	58.1±12.5	0.589
ESV(i)	25.5±7.6	24.2±6.5	0.473
SV(i)	31.0±8.0	33.9±6.8	0.062
EF(%)	55.1±5.6	58.7±4.2	0.003
GCS(%)	-22.4±6.6	-23.3±3.7	0.725
GLS(%)	-19.3±3.1	-22.0±3.3	<0.01
GAS(%)	-37.2±4.5	-40.6±4.0	<0.01

7. Táblázat: Bal- és jobb kamrai volumetriás és funkcionális paraméterek összehasonlítása.

BK: bal kamra; JK: jobb kamra; EF: ejekciós frakció; LVET: fokozott bal kamrai trabekularizáció; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; GAS: globális area strain; (i): testfelszínre indexált érték.

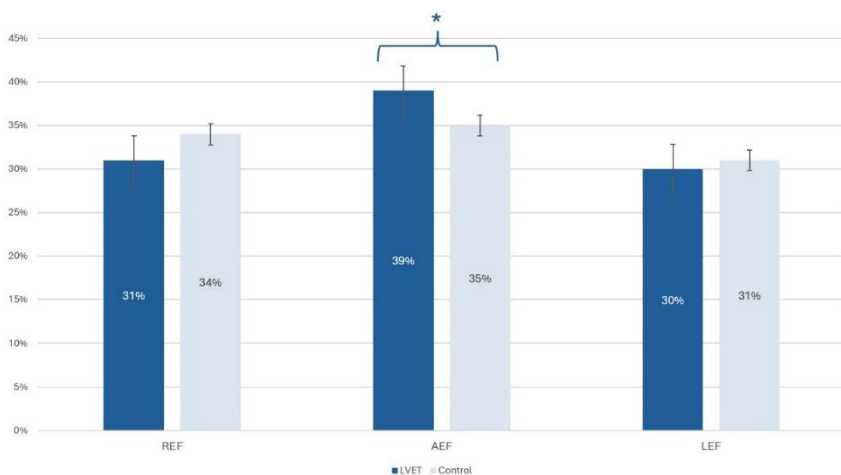
Az LVET-csoportban a LEF és REF abszolút értéke csökkent, míg az AEF relatív hozzájárulása szignifikánsan magasabb volt a kontrollcsoporthoz képest. Ez a mintázat a kontrakciós tengely eltolódását jelezte, vagyis az anteroposterior irányú mozgás dominánsabbá vált a longitudinális és radiális komponensek rovására.

A komponensek egymáshoz viszonyított aránya (AEF/LEF, AEF/REF) az LVET-csoportban szignifikánsan emelkedett, ami a jobb kamrai mechanika kompenzációs átrendeződésére utalhat, még megtartott globális EF mellett is.



1. Ábra: Jobb kamrai mozgáskomponensek összehasonlítása

*JK: jobb kamra; EF: ejekciós frakció; REF: radiális ejekciós frakció; AEF: anteroposterior ejekciós frakció; LEF: longitudinális ejekciós frakció; *: $p < 0,05$.*



2. Ábra: A mozgáskomponensek aránya a globális jobb kamrai ejekciós frakcióból

*REF: radiális ejekciós frakció; AEF: anteroposterior ejekciós frakció; LEF: longitudinális ejekciós frakció; *: $p < 0,05$.*

A korrelációs elemzések közepes–erős kapcsolatot mutattak a jobb és bal kamrai volumetriás paraméterek (EDV, SV) között, valamint a két kamra ejekciós frakciója között. A bal kamrai és jobb kamrai strainértékek, illetve funkcionális mutatók szintén szoros összefüggést mutattak, megerősítve a biventricularis kölcsönhatás szerepét.

		BK_EDV(i)	BK_ESV(i)	BK_SV(i)	BK_EF(%)	BK_GLS	BK_GCS
REF	r	0.046	0.083	0.011	-0.041	0.059	0.143
AEF	r	0.106	0.068	0.136	0.340*	-0.207	-0.112
LEF	r	0.026	-0.073	0.113	0.234	-0.238	-0.380*

8. Táblázat: A három kontrakciós irány korrelációja bal kamrai paraméterekkel.

BK: bal kamra; JK: jobb kamra; EF: ejekciós frakció; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; GAS: globális area strain; REF: radiális ejekciós frakció; AEF: anteroposterior ejekciós frakció; LEF: longitudinális ejekciós frakció.

A komponens-alapú paraméterek elemzése során is az AEF mutatott korrelációt a jobb kamrai EF-fel, míg a longitudinális és radiális komponensek esetében gyengébb kapcsolatot találtunk.

		JK_EDV(i)	JK_ESV(i)	JK_SV(i)	JK_EF	JK_GLS	JK_GCS	JK_GAS
REF	r	-0.044	-0.196	0.112	0.357*	-0.498**	-0.043	-0.236
AEF	r	-0.164	-0.412*	0.106	0.340*	0.588**	-0.771**	-0.28
LEF	r	0.023	-0.053	0.09	0.234	0.179	0.571**	-0.431**

9. Táblázat: A három kontrakciós irány korrelációja jobb kamrai paraméterekkel.

JK: jobb kamra; EF: ejekciós frakció; EDV: végdiasztolés térfogat; ESV: végszisztolés térfogat; SV: verővolumen; GLS: globális longitudinális strain; GCS: globális circumferentialis strain; GAS: globális area strain; REF: radiális ejekciós frakció; AEF: anteroposterior ejekciós frakció; LEF: longitudinális ejekciós frakció.

5. Konklúzió

A doktori értekezés három, egymásra épülő vizsgálatban elemezte a LVET morfológiai és funkcionális sajátosságait, különös tekintettel a jobb kamra érintettségére. A dolgozat a mágneses rezonancia és a modern echokardiográfiás technikák LVET diagnosztikájában és utánkövetésében betöltött szerepét vizsgálja.

Első vizsgálatunkban a szív-MR, a 2D és 3D echokardiográfia eredményeit hasonlítottuk össze LVET és egészséges személyek között. Az egészséges csoportban a volumetriás paraméterek kiváló egyezést mutattak a különböző modalitások között, míg az LVET-csoportban az intermodális korrelációk gyengültek, különösen a végszisztolés és deformációs paraméterek esetében. Vizsgálataink konzisztensen azt mutatták, hogy mind a 2D, mind a 3D echokardiográfiás mérések alacsonyabb volumetriás értékeket adtak, mint a CMR, és a 2D TTE szisztematikusan alulbecsülte a 3D TTE-vel kapott adatokat is. A 3D echokardiográfia ugyanakkor a CMR-hez legközelebb álló eredményeket biztosította, ezáltal non-invazív, reprodukálható és költséghatékony alternatívát kínálhat a hypertrabeculált betegek rendszeres utánkövetésére.

Második vizsgálatunkban háromdimenziós echokardiográfiával elemeztük a biventricularis funkciót megtartott bal kamrai ejekciós frakciójú LVET-populációban. Az LVET-csoportban valamennyi paraméter a normáltartományon belül maradt, ugyanakkor a kontrollcsoporthoz viszonyítva a bal kamrai volumenek szignifikánsan magasabbnak bizonyultak, míg a bal kamrai funkcióban érdemi eltérés nem volt megfigyelhető. A jobb kamra volumetriás értékei lényegében nem különböztek, ugyanakkor az ejekciós frakció és a strain-paraméterek enyhe, de szignifikáns csökkenést mutattak, ami a szubklinikus jobb kamrai funkcionális érintettségre utal. A bal és jobb kamrai paraméterek közötti szoros korrelációk a ventricularis interdependencia jelenlétét jelezték, amely fontos szerepet játszhat a hypertrabekuláció funkcionális következményeinek megértésében. Vizsgálatunk igazolta, hogy a jobb kamra funkcionális eltérései LVET-ben már a globális szisztolés funkció megtartása mellett is kimutathatók, és ezek szorosan összefüggenek a bal kamrai paraméterekkel, alátámasztva a biventricularis mechanikai kapcsolat klinikai jelentőségét.

Harmadik vizsgálatunkban a jobb kamrai kontrakció iránykomponenseit elemeztük egy új, dekompozíciós megközelítéssel (ReVISION szoftver). A globális jobb kamrai ejekciós frakció megtartott maradt, ugyanakkor a mozgáskomponensek aránya szignifikánsan eltért a kontrollcsoportétól: a longitudinális és radiális komponensek csökkentek, míg az anteroposterior irányú mozgás aránya emelkedett. Ez a mintázat a jobb kamrai mechanika kompenzációs átrendeződésére utal, amely a korai funkcionális remodelling jele lehet. A komponensek és a globális paraméterek közötti szoros összefüggések tovább erősítették a két kamra biventricularis dinamikai kapcsolatát, jelezve, hogy az LVET nem csupán morfológiai, hanem funkcionális szinten is komplex kölcsönhatásokkal jellemezhető állapot. Eredményeink alapján a ReVISION-analízis képes volt finom, irányfüggő eltéréseket kimutatni a jobb kamra mechanikájában LVET esetén, amelyek a hagyományos funkcionális paraméterekben még nem jelentkeznek. Ez a módszer így alkalmas lehet a korai, szubklinikai funkcionális remodelling

detektálására ebben a betegpopulációban, hozzájárulva a biventricularis adaptáció korai felismeréséhez.

Összességében kutatásunk rámutat, hogy a LVET nem pusztán morfológiai variáns, hanem komplex, funkcionális és biventricularis jelenség, amely a szív mechanikai működésének finom átrendeződésével járhat. A háromdimenziós echokardiográfia és a komponensalapú mozgáselemzés együttes alkalmazása új diagnosztikai perspektívát nyithat az LVET populáció értékelésében, lehetővé téve a korai eltérések felismerését, valamint a személyre szabott követés és kockázatbecslés pontosítását a jövő klinikai gyakorlatában.

6. Irodalomjegyzék

Disszertációhoz kapcsolódó közlemények

1. Horváth M, Kiss D, Márkus I, Tokodi M, Kiss AR, Gregor Z, et al. Comparison of imaging modalities for left ventricular noncompaction morphology. *J Imaging*. 2025;11(6):185.
IF (2025): 3.3
2. Horváth M, Farkas-Süto K, Fábíán A, Lakatos B, Kiss AR, Grebur K, et al. Highlights of right ventricular characteristics of left ventricular noncompaction using 3D echocardiography. *IJC Heart Vasc*. 2023;41:101289.
IF (2023): 2.28
3. Horváth M, Farkas-Süto K, Gyulánczi FK, Fábíán A, Lakatos B, Kiss AR, et al. 3D echocardiographic assessment of right ventricular involvement of left ventricular hypertrabecularization from a new perspective. *J Imaging*. 2025;11(6):181.
IF (2025): 3.3

Disszertációhoz nem kapcsolódó közlemények

1. Grebur K, Mester B, Fekete BA, Kiss AR, Gregor Z, Horváth M, et al. Genetic, clinical and imaging implications of a noncompaction phenotype population with preserved ejection fraction. *Front Cardiovasc Med*. 2024;11:1337378.
IF (2024): 2.9
2. Szucs A, Kiss AR, Gregor Z, Horváth M, Tóth A, Dohy Z, et al. Changes in strain parameters at different deterioration levels of left ventricular function: A cardiac magnetic resonance feature-tracking study of patients with left ventricular noncompaction. *Int J Cardiol*. 2021;328:1-9.
IF (2021): 2.46
3. Kiss AR, Gregor Z, Furak A, Tóth A, Horváth M, Szabó L, et al. Left ventricular characteristics of noncompaction phenotype patients with good ejection fraction measured with cardiac magnetic resonance. *Anatol J Cardiol*. 2021;25(3):196-203.
IF (2021): 1.5
4. Babity M, Zamodics M, Konig A, Kiss AR, Horvath M, Gregor Z, et al. Cardiopulmonary examinations of athletes returning to high-intensity sport activity following SARS-CoV-2 infection. *Sci Rep*. 2022;12:24486.
IF (2022): 4.44
5. Grebur K, Gregor Z, Kiss AR, Horváth M, Mester B, Czibalmos C, et al. Different methods, different results? Threshold-based versus conventional contouring techniques in clinical practice. *Int J Cardiol*. 2023;371:123-31.

IF (2023): 2.20

6. Grebur K, Mester B, Horváth M, Farkas-Sütö K, Gregor Z, Kiss AR, et al. The effect of excessive trabeculation on cardiac rotation: A multimodal imaging study. *PLoS One*. 2024;19(4):e0308035.

IF (2024): 2.6

7. Gregor Z, Kiss AR, Szabó LE, Tóth A, Grebur K, Horváth M, et al. Sex- and age-specific normal values of left ventricular functional and myocardial mass parameters using threshold-based trabeculae quantification. *PLoS One*. 2021;16(10):e0258362.

IF (2021): 3.75

8. Zamodics M, Babity M, Schay G, Bucsko-Varga A, Kovacs E, Horvath M, et al. Investigation of body composition and cardiac sports adaptation in elite water polo players. *Sports (Basel)*. 2025;13(6):180.

IF (2025): 2.9

9. Komlósi F, Arnóth B, Szakál I, Tóth P, Mészáros H, Sánta H, et al. Comparative analysis of therapeutic strategies in atrial fibrillation patients with left atrial appendage thrombus despite optimal NOAC therapy. *Clin Res Cardiol*. 2025;Epub ahead of print.

IF (2025): 3.7